

**APORTE AL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE LA QUEBRADA LA  
TARUCA MUNICIPIO DE MOCOA, DEPARTAMENTO DE PUTUMAYO, A  
TRAVÉS DE LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE  
INUNDACIÓN POR CAMBIO DE CAUCE, MEDIANTE LA COMBINACIÓN  
DE MÚLTIPLES TÉCNICAS GEOMÁTICAS.**

**Evento Natural Avenida Torrencial del 1 de abril de 2017 – Evento 12 de agosto  
de 2018**



**YAMILE GOMEZ GUERRERO**

Proyecto de Grado presentado como requisito para optar al Título de

**ESPECIALISTA EN GEOMÁTICA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA  
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA  
DICIEMBRE DE 2018**

**APORTE AL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE LA QUEBRADA LA TARUCA MUNICIPIO DE MOCOA, DEPARTAMENTO DE PUTUMAYO, A TRAVÉS DE LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE INUNDACIÓN POR CAMBIO DE CAUCE, MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE MÚLTIPLES TÉCNICAS GEOMÁTICAS.**

**Evento Natural Avenida Torrencial del 1 de abril de 2017 – Evento 12 de agosto de 2018**

CONTRIBUTION TO THE VULNERABILITY ANALYSIS OF THE LA TARUCA CREEK MUNICIPALITY MOCOA, DEPARTMENT OF PUTUMAYO, THROUGH THE DEVELOPMENT OF THE FLOOD SUSCEPTIBILITY MAP BY CHANGE OF CAUCE, THROUGH THE COMBINATION OF MULTIPLE GEOMÁTIC TECHNIQUES.

Torrential Avenue Natural Event of April 1, 2017 - Event August 12, 2018

Primer Autor, Ingeniera Topográfica, estudiante *Especialización en Geomática UMNG*

**RESUMEN**

*Observando la fuerza y poder destructivo que tiene un evento como el ocurrido en Mocoa en el 2017, es necesario analizar un número significativo de variables, para determinar cuáles propiciaron la magnificación del desastre. La implementación e integración de diferentes técnicas y metodologías, tales como la topografía convencional, los levantamientos con tecnología GNSS, el uso de aeronaves no tripuladas, la percepción remota entre otros son herramientas que desde el ámbito de la Geomática facilitan la obtención de información primaria y secundaria de la zona de desastre, generando productos cartográficos utilizados como insumos para modelar diferentes escenarios y poder tomar decisiones sobre las medidas necesarias para reestablecer la economía del municipio, mitigando el impacto en la infraestructura, los daños ambientales y las pérdidas humanas. Uno de los resultados de este estudio determina el área susceptible de inundación en el municipio y evalúa la capacidad de respuesta de las obras de contención construidas frente a un evento de características similares.*

**Palabras Clave:** *Aeronaves no tripuladas, Modelo digital de superficie (DSM), Modelo digital del terreno, ortomosaico, Caudal de diseño, Flujo de detritos.*

**ABSTRACT**

*Observing the strength and destructive power of an event such as the one that occurred in Mocoa in 2017, it is necessary to analyze a significant number of variables to determine which ones led to the magnification of the disaster. The implementation and integration of different techniques and methodologies, such as conventional topography, surveys with GNSS technology, the use of unmanned aircraft, remote sensing, among others, are tools that from the Geomatics field facilitate the obtaining of primary information and secondary of the disaster area, generating cartographic products used as inputs to model different scenarios and make decisions on the necessary measures to reestablish the economy of the municipality, mitigating the impact on infrastructure, environmental damage and human losses. One of the results of this study determines the area susceptible to flooding in the municipality and evaluates the response capacity of containment works constructed in the face of an event with similar characteristics.*

**Key words:** *Unmanned Aircraft Vehicle, Digital Surface Model (DSM), Digital Terrain Model (DTM), Orthomosaic, Design Flow, Debris Flow.*

## I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo trata del análisis de vulnerabilidad de la cuenca la quebrada La Taruca, de las obras civiles de prevención ejecutadas por los gobiernos Nacional, Departamental y municipal como medidas de mitigación/prevención, después de los eventos ocurridos el día 31 de marzo de 2017 en los cuales una creciente abrupta y con extrema fuerza, arrasó con parte de la ciudad de Mocoa en el departamento de Putumayo.

Se hará un análisis geomático e hidrogeomorfológico de la cuenca de dicho cuerpo de agua, se analizará su trazado (actual y anterior al evento), se analizará el posible resultado de un evento con características similares en las condiciones actuales y el posible impacto sobre el área de influencia del afluente mencionado; los resultados de los análisis realizados servirán para evaluar el estado de vulnerabilidad de la quebrada La Taruca, así como las obras ejecutadas en su alcance y pertinencia.

Se hará uso de diferentes métodos de geomática aplicada para las diferentes fases del proyecto, desde la obtención de información primaria, su representación y modelamiento, así como el análisis y simulación de un evento de similares proporciones.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Entre el 31 de marzo y el primero de abril se presentaron intensas lluvias en la cuenca alta de la Quebrada La Taruca y los ríos Sangoyaco y Mulato, ubicados en el Municipio de Mocoa. Este evento ocasionó la acumulación y el desplazamiento de un flujo de detritos<sup>1</sup> que a su paso acabó con la vida de cerca de 400 personas y dejó un sinnúmero de damnificados. A la fecha no se han implementado medidas efectivas para estimar la vulnerabilidad de la zona frente a los cambios hidrogemorfológicos que permitan prevenir tragedias similares.

A pesar que existen estudios de vulnerabilidad y riesgo por inundación y movimientos en masa que determinaron las áreas potenciales de afectación, uno de los principales problemas derivados del evento, se refiere a la modificación radical del cauce de la Quebrada La Taruca, además de la construcción de diques de contención con el material arrastrado en el evento, los cuales afectan de manera directa la dinámica hídrica y las nuevas áreas potenciales de amenaza de inundación, por consiguiente, se requieren nuevos estudios y planes de prevención y control del riesgo.

Adicionalmente, desde el punto de vista social coexisten problemas de reubicación voluntaria de la población en la zona de desastre, que por un lado no ha podido ser atendida debidamente por los programas de ayuda implementados por

---

<sup>1</sup> Es una masa móvil, saturada en agua, compuesta de una mezcla de rocas, sedimentos, agua y gases, donde entre el 50 y el 80% del material es sólido y se encuentra suspendido en agua. Se desplaza pendiente abajo por influencia de la gravedad, posee un rápido avance, gran movilidad y gran capacidad destructiva. (Servicio Nacional de Geología y Minería Chileno, 2017)

el Estado y, por otro lado, dada la falta de conciencia sobre el riesgo al que se exponen por continuar ubicados en esta zona.

Las nuevas tecnologías generadas desde el campo de la Geomática, pueden ser determinantes para obtener información eficiente que en tiempo real entrega insumos para los diferentes tipos de análisis que se requieren en la estimación de vulnerabilidad y riesgo.

Tradicionalmente, se tenía como insumo las fotografías aéreas obtenidas por fotogrametría convencional, una técnica de gran precisión, pero con grandes demandas logísticas, recursos físicos y presupuestales. Hoy en día el uso multitudinario de las aeronaves no tripuladas, el desarrollo y acceso a nuevos softwares, facilita obtener insumos de alta calidad que satisfacen los requerimientos técnicos para análisis más eficientes y oportunos especialmente en las temáticas de riesgos por eventos naturales. No obstante, se deben combinar diversas técnicas como la interpretación de imágenes de satélite, la topografía convencional y los procesamientos en sistemas de información geográfica, que permitan obtener resultados con precisión, calidad, rigurosidad y sean la base para toma de decisiones informada y oportuna.

El presente estudio aporta al análisis de vulnerabilidad de la Quebrada la Taruca, Municipio de Mocoa, a través de la determinación de la capacidad de contención de los muros y diques parcialmente construidos como parte de las obras para la mitigación y prevención de desastres, en un escenario con una magnitud total de material transportado igual al ocurrido en el evento del 2017 y el presentado en agosto de 2018 que aunque

contó con un número menor de pérdidas humanas si presentó importantes afectaciones en la infraestructura del municipio, Identificando además zonas en las cuales se necesitan estudios más detallados que permitan caracterizar de forma más precisa la dinámica de las inundaciones.

### III. DATOS Y METODOS

Este estudio se desarrolla en el departamento del Putumayo en el municipio de Mocoa, específicamente en las microcuencas de las quebradas Taruca, Taruquita y los Ríos Sangoyaco y Mulato, todos estos desembocando en el río Mocoa y que fueron parte del evento avenida torrencial<sup>2</sup> del 31 de marzo de 2017. Esta zona se caracteriza principalmente por presentar una gama de geoformas que van desde laderas altas de cordillera hasta planicies onduladas, sus pendientes en las zonas montañosas alcanzan hasta el 75%, las siguientes unidades de relieve manejan cambios abruptos de pendiente encontrando algunas entre el 3% y el 50 %.

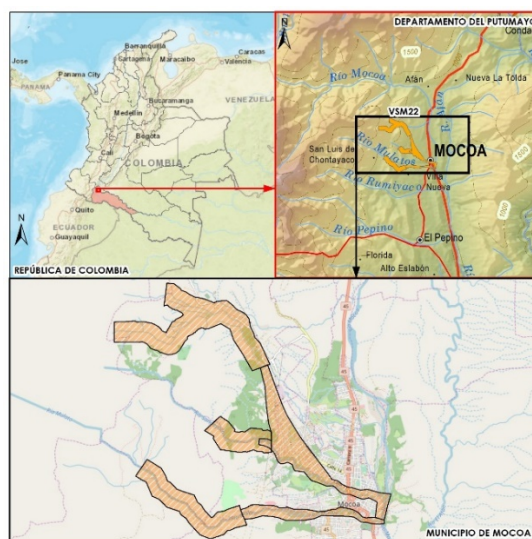


Ilustración 1. Localización General del Proyecto. Fuente Propia

<sup>2</sup> Evento que se caracteriza por el arrastre de rocas de gran volumen, capa vegetal y removilización de materiales de antiguos abanicos fluviotorrenciales del lecho de las corrientes de agua. (Servicio Geológico Colombiano, 2018)

## 1. Documentación y revisión bibliográfica

Inicialmente se realiza una revisión bibliográfica de toda la documentación presentada por parte de la *Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres* y el *Servicio Geológico Colombiano*, en donde se presentan los análisis morfométricos, geomorfológicos, geológicos e hidrológicos de la zona previos y posteriores al evento para entregar una zonificación de amenaza por movimientos en masa. Estos resultados se usaron como insumos complementarios para determinar la capacidad de contención de los diques existentes.

## 2. Levantamiento Topográfico

Durante los días 24 de marzo al 2 de mayo de 2018, se llevó a cabo la fase de campo del levantamiento fotogramétrico, control terrestre y levantamiento topográfico convencional altimétrico y planimétrico para obtener la información primaria base de este estudio.

Para la red de GPS de manera de manera preliminar se identificó el NP-117-TS-2 como control horizontal y vertical para la determinación de coordenadas mediante tecnología GNSS el cual, al ser este vértice un punto de nivelación geodésica, sirvió como punto de referencia vertical para el proyecto. Estratégicamente se localizó un vértice para trasladar las coordenadas dentro del área de trabajo, dicho vértice se denominó GPS-1 y fue posicionado por medio de un levantamiento estático diferencial usando equipos doble frecuencia, a partir de la constelación de satélites NAVSTAR de los EUA (GPS) y metodología de doble determinación.

Para esto se utilizó como primer punto de control horizontal y vertical la estación de rastreo permanente del servicio Geológico de Colombia OVSC ubicada en la Ciudad de Pasto, conformando un vector de 68.5 kilómetros. No

fue posible la utilización de estaciones de la red MAGNA-ECO del IGAC debido a que la estación más cercana en funcionamiento a la fecha del trabajo era la de Cali, a una distancia de más de 255 kilómetros haciendo inviable su utilización. Como segundo punto de control horizontal y vertical se utilizó el vértice de la Red pasiva MAGNA denominado 117-TS-2, conformando el segundo vector, con una longitud de 1.9 kilómetros a GPS-1



Ilustración 2. Doble Determinación GPS1.

Estos puntos se usaron para la densificación de la Red de georreferenciación del proyecto posicionando un total de 12 puntos.

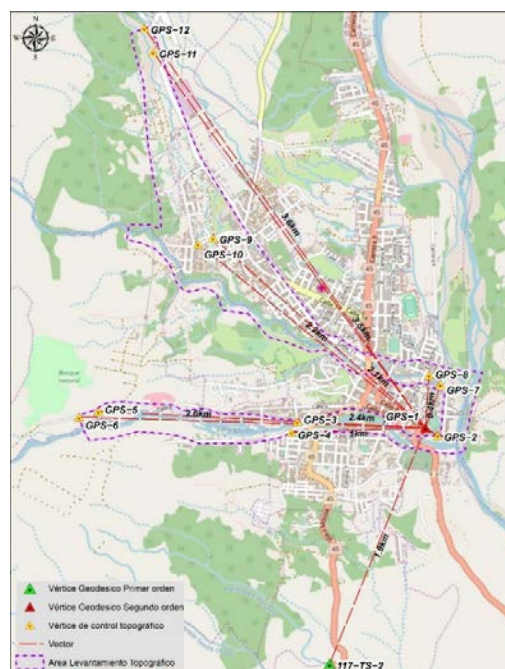


Ilustración 3. Localización Vértices Georreferenciación

Una vez establecida la red se trazaron 4 poligonales cerradas, estas se construyeron por



el método de ceros atrás y ajustando angularmente por el método de Crandall, basados en los promedios angulares y de distancias. Este método de ajuste tiene como principio corregir el error angular distribuyendo por partes iguales entre todos los ángulos para después mediante ajuste ponderado corregir el error lineal o en distancia.

La poligonal 1 partió de los puntos GPS7 y GPS8 hacia el noroeste cerrando en los puntos GPS9 y GPS10, la poligonal 2 pario de los GPS9 y GPS10 hacia el norte hasta los puntos GPS11 y GPS12 cubriendo toda el área de influencia de la Quebrada la Taruca y el Río Sangoyaco. Las poligonales 3 y 4 se establecieron entre los puntos GPS1 y GPS2, pasando por los GPS3 y GPS4 cerrando en el GPS5 Y GPS6 a lo largo del Río Mulato.

Ajustadas las coordenadas (N, E) y las cotas geométricas de la totalidad de los deltas de las poligonales se tomaron todos los detalles de vías, niveles, breaklines, secciones topobatemétricas de las corrientes superficiales de agua de interés, entre otros.

### 3. Levantamiento Fotogramétrico

Tradicionalmente la fotografía aérea se ha hecho con aviones tripulados, lo que significa un alto costo operacional, técnico y logístico, especialmente útil para grandes alturas de vuelo y áreas de cobertura del orden municipal y departamental, sin embargo, las nuevas tecnologías cartográficas que integran avances en electrónica y aviónica han permitido la utilización de los UAV (Unmanned Aircraft Vehicle) o Vehículos aéreos no tripulados para aplicaciones civiles.

Esta tecnología, junto con software fotogramétricos específicos son una herramienta invaluable para la percepción remota o teledetección permitiendo obtener resultados con buenas precisiones con una

reducción importante de costos operacionales para proyectos de extensión media. El diseño preliminar del vuelo se realizó mediante el software DroneDeploy, donde a partir de datos iniciales como la resolución requerida (GSD), geometría del área a cartografiar, modelo digital de terreno y coordenadas del lugar de despegue se simuló el vuelo determinando todas las variables necesarias para el mismo.

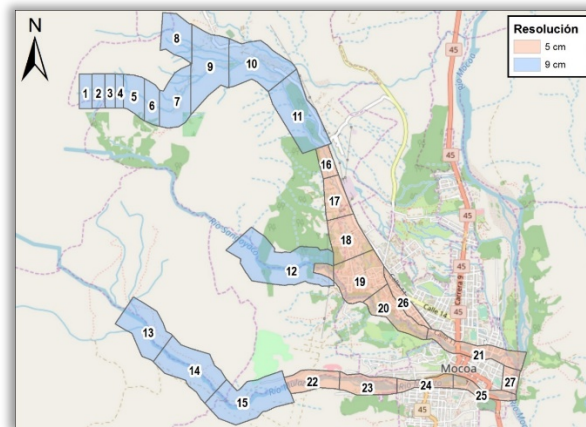


Ilustración 4. Vuelos fotogramétricos. Fuente propia

Debido a las condiciones geomorfológicas del área en estudio se definieron 2 áreas con GSD uno de 9 cm para las zonas montañosas y 5 cm para el área ondulada y urbana.

PARAMETROS VUELOS MOCOCA	
Número de vuelos	27
Distancia Total de Vuelo km	84
Cobertura en Tierra por vuelo	6-40 ha
Número de líneas por vuelo	8 - 12 líneas
Distancia entre líneas e vuelo	30-70 m
Distancia entre centros de fotos	20-25 m
Altura de vuelo máxima sobre el terreno	110 metros y 250 metros
Traslape Lateral	75%
Traslape longitudinal	65%
Resolución espacial final estimada	5 y 9 cm

Tabla 1. Parámetros generales de diseño de los vuelos fotogramétricos. Fuente propia.

Definidos estos parámetros se realizó el vuelo usando un UAV Marca DJI PHANTOM 4 Advanced, monitoreando en tiempo real toda la información de telemetría de vuelo, estado de

la aeronave y posición mediante el GPS de abordó.

Mediante software Agisoft FotoScan V1.4.2, se realiza el ensamble de pares estereoscópicos (pares de fotos adyacentes) y se realiza la aerotriangulación del modelo con las coordenadas de los puntos de fotocontrol para poder dar solidez al sistema y obtener así unos resultados con alta fiabilidad.

Una vez realizado este proceso se generó una imagen ortorectificada que nos sirvió como insumo para generar otros productos cartográficos como el modelo digital de superficie que apoyada o complementada con la información obtenida del levantamiento topográfico convencional de detalles permitió generar un modelo digital del terreno muy robusto que permite realizar mediciones con muy alta precisión.



*Ilustración 5. Vista en perspectiva de la nube de puntos.*

#### 4. Modelación superficie inundación

Esta información sumada al análisis hidrológico del área del estudio realizado por el servicio geológico colombiano, en donde se tomaron en cuenta los valores anuales de precipitación media, mínima y máxima. (mm/año) de las estaciones Acueducto, Campucana, Pto Limón, Condagua, Patoyaco y Torre Tv San Francisco,

fue usada para simular de manera muy cercana el máximo caudal líquido y sólido transitado en el evento del 31 de marzo de 2017. Para ello se establecieron 13 secciones sobre los cauces relacionados anteriormente, de las cuales 6 fueron ubicadas en la quebrada La Taruca. El resultado de esta etapa fue el caudal máximo transportado para cada una de las secciones analizadas; de estos caudales se seleccionó el mayor 362 m<sup>3</sup>/s como parámetro base para el modelamiento del nuevo cauce de dicha quebrada y así obtener el mapa de susceptibilidad de inundación (Ministerio del Medio Ambiente, 2018) teniendo en cuenta la presencia de los diques de contención construidos por el gobierno para mitigar esta clase de eventos.

El software utilizado para realizar este proceso es el Hec-GeoRAS 10, que es una extensión para ArcGis 10 desarrollada conjuntamente por el *Hidrology Engineering Center (HEC)* del *United States Army Corps of Engineers* y el *Environmental System Research Institute (ESRI)* Básicamente es un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades especialmente diseñadas para procesar datos georreferenciados que permiten bajo el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilitar y complementar el trabajo con HEC-RAS. (Molero, 2013).

Es necesario contar con secciones transversales o topo-batimétricas medidas en campo, el modelo digital del terreno en formato *TIN* (*Triangulated Irregular Network*) lo más detallado posible, de forma tal que se obtenga la geometría del cauce.

Este modelamiento sigue tres pasos principales:

- **Preproceso:** Trabajo previo en ArcGis para generar un archivo de importación

para HEC-RAS que incluirá la información de la geometría de las secciones transversales del cauce

- **Modelación:** del flujo con HEC-RAS y creación de archivo de exportación para ArcGis.
- **Postproceso:** en ArcGis donde se generan las superficies de inundación.

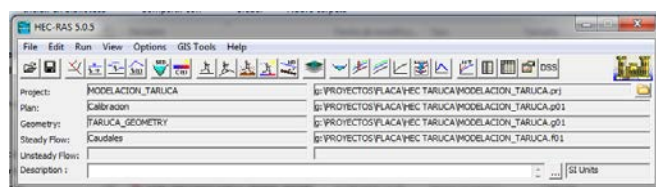


Ilustración 6. Modelación En software HEC-RAS

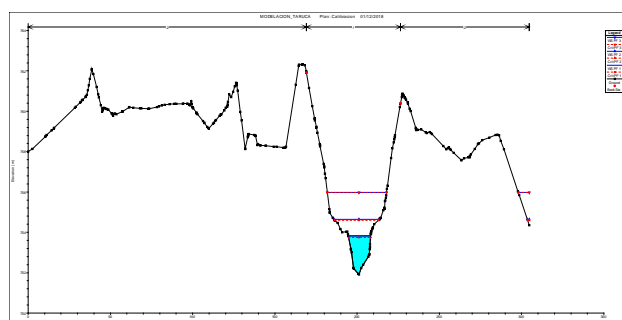


Ilustración 7. Ejemplo de sección transversal modelada con Dique de contención sobre la Q. La Taruca.

#### IV. RESULTADOS

En cuanto al modelo digital de superficie (DSM), se obtuvo el principal insumo de este proyecto cartográfico, el ortomosaico, con una resolución espacial igual a cinco centímetros (5 cm) conforme a lo planeado logrando una cobertura del 100% de las áreas de interés, en cual se pueden realizar mediciones, debido a que fueron corregidas sus deformaciones generadas por el relieve, la falta de verticalidad de la fotografía y los movimientos del avión.

Dado que el cauce original de la quebrada fue desplazado hasta 575 m al occidente, hubo la necesidad de tomar secciones topobatemétricas sobre el nuevo trazado que permitieron modelar la nueva área de inundación (Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM, 2017). Este cambio de cauce es perfectamente identificable en una imagen PlanetScope de noviembre de 2016 (ilustración 8) y en el ortomosaico generado partir del vuelo fotogramétrico en mayo 2018 (ilustración 9), en donde se puede evaluar la magnitud del desastre observando que más del 25% de la infraestructura urbana fue afectada, al igual que las diferentes coberturas vegetales de la Zona.

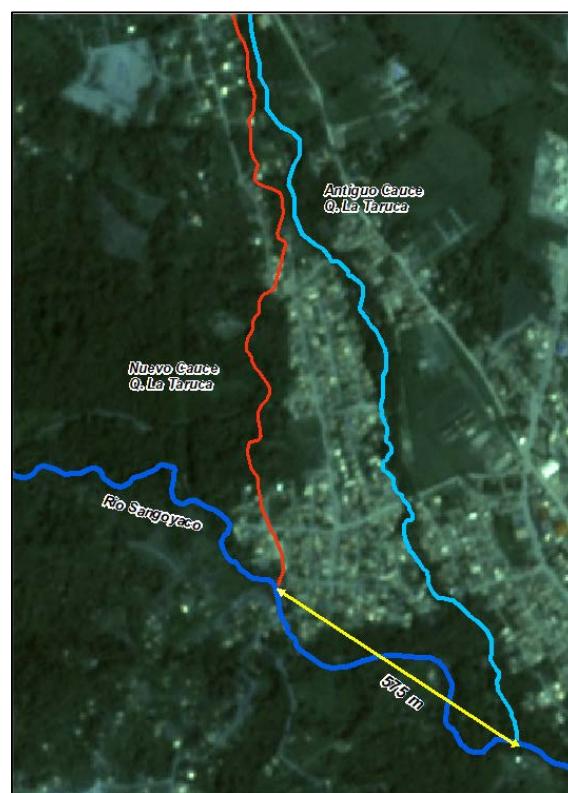


Ilustración 8. Cambio Cauce Q. La Taruca. Imagen PlanetScope del 21 de noviembre de 2016, 3 m de resolución espacial.





Ilustración 9. Cambio Cauce Q. la Taruca. Ortomosaico, mayo de 2018, 5 cm de resolución espacial.

Con el modelo digital del terreno las secciones transversales y el modelamiento hidrológico del evento se obtuvieron las siguientes superficies de inundación, la primera usando el caudal máximo de diseño de 362 m<sup>3</sup>/s en un área enmarcada con secciones desde el cambio del cauce incluyendo los diques construidos hasta la desembocadura de la quebrada en el Río Sangoyaco y este a su vez en el Río Mocoa (ilustración 10).

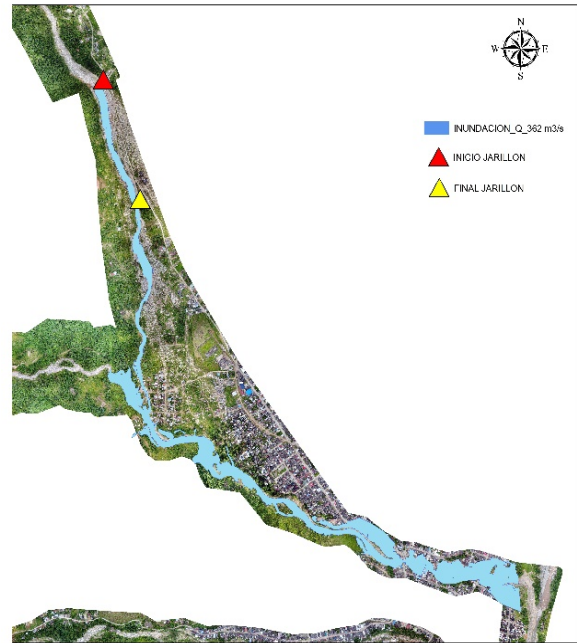


Ilustración 10. Superficie inundación  $Q = 362 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La segunda 500m al norte del inicio del Dique de contención en donde el cambio de pendiente es muy brusco y el cauce es más angosto convirtiéndose en un punto con alta probabilidad de represamiento aunado al cambio de posición del cauce original (Ilustración 11).

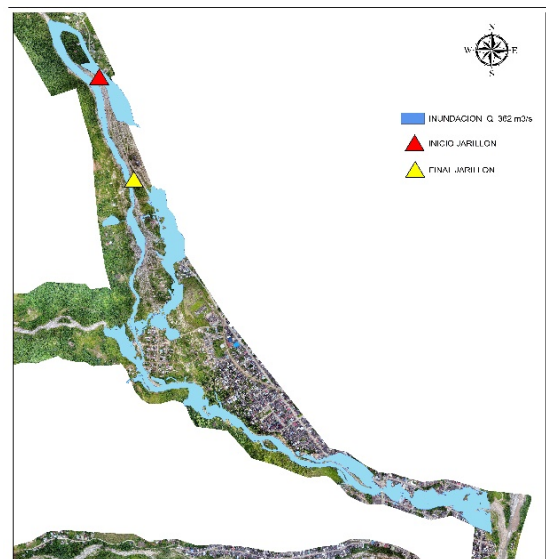


Ilustración 11. Superficie Inundación 500m norte del inicio del Dique

## V. CONCLUSIONES

- Los diques contruidos con el material de arrastre proveniente del evento tienen unas dimensiones adecuadas para proteger las zonas más vulnerables a lo largo del tercio final de la quebrada La Taruca, sin embargo, este mismo dique es insuficiente para proteger el cauce desde su punto final, aguas abajo hasta la desembocadura en el Río Sangoyaco debido a la tendencia natural de la quebrada a retomar su trazado inicial.
- Los pobladores han impedido la construcción del dique al sur de la quebrada La Taruca y hasta su desembocadura en el Río Sangoyaco ya que no existe un censo real de la población afectada por lo tanto, el programa de reubicación de los damnificados se ha tornado lento debido a que la compra de los terrenos no ha sido posible de manera consensuada, obligando a la nación a expropiar los terrenos; esta condición mantiene dicho tramo en constante vulnerabilidad, puesto que fue una de las zonas de mayor afectación en el evento del 31 de marzo de 2017.
- El modelamiento del nuevo cauce toma como punto de inicio el lugar donde empieza el dique construido y los resultados obtenidos están enmarcados en dicho escenario pero, si el evento se presenta 500m aguas arriba del punto descrito, en uno de los puntos que han sido identificados con una alta probabilidad de represamiento, las consecuencias del evento analizado se magnifican debido a que el evento no solo contaría con el trazado actual de la quebrada sino con el trazado original de la misma, el cual aún presenta cotas más bajas en ciertos sectores, ampliando así el área probable de inundación, rebosando la capacidad del dique de encauzar el flujo.
- Es necesario construir estructuras de contención sobre el cauce del río Sangoyaco ya que, aunque los efectos del evento del 2017 no fueron de las mismas proporciones que los observados aguas arriba, la emergencia ocurrida en agosto del 2018 dejó en evidencia que el área continúa siendo altamente vulnerable y susceptible de presentar afectaciones por las inundaciones no solo para la infraestructura urbana existente tal como puentes, vías y viviendas sino para el componente humano ubicado allí.
- La integración de múltiples tecnologías y herramientas geomáticas permiten modelar y analizar diferentes variables espaciales obteniendo resultados precisos y confiables que pueden ser usados en la toma de decisiones de manera efectiva y oportuna.

## VI. Referencias

- Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM. (Diciembre de 2017). GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE INUNDACIÓN. Bogotá, Colombia.
- Ministerio del Medio Ambiente. (Octubre de 2018). *Sistema de Información Ambiental de Colombia*. Obtenido de <http://www.siac.gov.co/inundaciones>
- Molero, E. (Febrero de 2013). *Researchgate*. Obtenido de Manual Básico de HEC-GeoRAS 10 v.3: <https://www.researchgate.net/publication/236774291>
- Servicio Geológico Colombiano. (2018). *AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO FLUJO DE LAS CUENCAS DE LAS QUEBRADAS*

*TARUCA, TARUQUITA, SAN ANTONIO Y EL CARMEN Y LOS RÍOS MULATO Y SANGOYACO, MUNICIPIO DE MOCOA, ESCALA 1:5.000. Bogotá.*

Servicio Nacional de Geología y Minería Chileno. (9 de Noviembre de 2017). *Servicio Nacional de Geología y Minería Chileno*. Obtenido de <http://www.sernageomin.cl/faq-items/flujo-de-detritos/>

#### *Agradecimientos especiales a:*

**CIGmap SAS. Consultoria en Ingeniería Geomática y Medio Ambiente S.A.S**, por colaborar de manera directa con el desarrollo de este proyecto a través del apoyo logístico, suministro tecnológico y permitirme compartir los datos obtenidos.